

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ГРАНУЛИРОВАННОГО ЧУГУНА НА ДВИЖУЩЕЙСЯ ПОДИНЕ

Аннотация

Разработанная модель базируется на фундаментальном математическом описании тепломассообмена при наличии химических реакций внутри рудугольных окатышей и теплообмена в объеме кольцевой печи с вращающимся подом, отапливаемой газообразным топливом. На графиках приведены расчетные результаты, иллюстрирующие характер протекания технологического процесса по длине печи и по радиусу окатышей, а также влияние на производительность печи некоторых технологических факторов.

Ключевые слова: рудугольные окатыши, печь с вращающимся подом, тепломассообмен, кинетика восстановления железа, кинетика газификации углерода.

Abstract

The designed model is based on fundamental mathematical formulation of the heat-and-mass exchange with presence of chemical reactions inside of iron-ore coal pellets and heat exchange within entire space of rotary hearth furnace heated by gaseous fuel. The estimated results are given in diagrams. They depict the features of process operation within length of the furnace and within radius of pellets along with impact of certain process factors on the furnace output.

Keywords: iron ore-coal pellets, rotary hearth furnace, heat-and-mass exchange, kinetics of iron reduction, kinetics of carbon gasification.

Новая бескоксовая технология производства чугуна в виде гранул из рудугольных окатышей, лежащих монослоем на угольной подушке, в печи с вращающимся подом, разработана японской фирмой Kobe Steel [1; 2]. Были сооружены пилотная и демонстрационная установки, проведены исследования и на основании их результатов построена в США (штат Миннесота) первая промышленная установка мощностью по чугуну 0,5 млн. т/год. Авторы отмечают преимущества новой технологии, заключающиеся в существенном снижении удельных капитальных затрат, эксплуатационных расходов и энергетических затрат на производство чугуна по сравнению с доменным процессом.

В РФ металлурги также проявляют интерес к новой технологии, в частности Магнитогорский металлургический комбинат для переработки Бакальских сидеритовых руд [3], а по другой информации и для южно-уральских титаномagnetитов. В связи с этим в ООО «НПВП ТОРЭКС» была поставлена задача разработать математическую модель новой технологии, получившей название ITmk3 (Ironmaking Technology mark 3 – технология производства чугуна третьего поколения). Модель базируется на фундаментальном математическом описании тепломассообмена при наличии химических реакций внутри рудугольных окатышей и

теплообмена в объеме кольцевой печи с вращающимся подом. В данной статье не преследовалась цель полного описания математической модели технологического процесса, включающей этапы нагрева и восстановления рудоугольных окатышей, их плавления и охлаждения.

Наиболее интересен и важен первый этап процесса, включающий наравне с теплообменом ряд химических реакций: газификация угля окислительными компонентами газа (CO_2 и H_2O), восстановление оксидов железа с помощью CO и H_2 , окисление железа и углерода в наружных слоях окатыша за счет окислительных компонентов газовой среды в потоке «печного» газа. При этом большую роль играет массоперенос в порах окатыша по его радиусу за счет диффузии газовых компонентов (в том числе и азота) и молярного потока газа, возникающего в порах окатыша вследствие протекания реакций с увеличением объема газа (газификация, разложение известняка) и повышения давления в порах. В целом модель теплообмена в окатыше представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, решение которой выполняется с помощью компьютерной программы методом конечных разностей.

Общий вид уравнений переноса всех компонентов сложной газовой смеси (СГС) представлен следующим соотношением:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left[D_i \cdot r^2 \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho_i}{\rho} \right) \right] - \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (w \cdot \rho_i \cdot r^2) + \Sigma I_i = 0 \quad (1)$$

где r – текущий радиус окатыша;

D_i – коэффициент диффузии i -го компонента в СГС;

ε – текущая пористость окатыша,

ρ – плотность СГС;

ρ_i – парциальная плотность i -го компонента;

w – скорость молярного потока;

ΣI_i – алгебраическая сумма источников (стоков) i -го компонента.

В качестве граничных условий для уравнения (1) приняты следующие соотношения:

$$\left. \frac{\partial \rho}{\partial r} \right|_{r=0} = 0; \quad w|_{r=0} = 0;$$

$$\left[D_i \cdot \varepsilon \cdot \rho \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\rho_i}{\rho} \right) \right]_{r=R} = \beta \left[\left(\frac{\rho_i}{\rho} \right)_{\Gamma} - \left(\frac{\rho_i}{\rho} \right)_{r=R} \right]; \quad (2)$$

где R – радиус окатыша; индекс Γ обозначает газ, омывающий окатыш.

Математическое описание процесса нагрева окатыша основано на классическом уравнении нестационарной теплопроводности, которое в данном случае с учетом тепловых эффектов реакций имеет следующий вид:

$$U_n \cdot \frac{\partial}{\partial x} (C_{ок} \cdot \rho_{ок} \cdot T) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \cdot \lambda_{ок} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) +$$

$$+ \Sigma I_j \cdot Q_j - \rho \cdot w \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (3)$$

где U_n – линейная скорость движения пода печи;

$c_{ок}$, $\rho_{ок}$, T , $\lambda_{ок}$ – теплоемкость, плотность, температура и теплопроводность окатыша;

I_j – источник массы;
 j – реакции;
 Q_j – удельный тепловой эффект j -реакции;
 c_p – теплоемкость СГС.

Расчет кинетики протекания отдельных реакций выполняется на базе эмпирических уравнений, связывающих скорость реакции с температурой, удельной поверхностью твердой фазы, составом газовой среды и степенью завершения процесса. Эти уравнения получены на основании результатов лабораторных исследований. Адаптация модели произведена на базе имеющихся экспериментальных данных и литературных источников (результатов испытаний на пилотных установках).

Расчет теплообмена в печи включает описание конвективных и лучистых тепловых потоков в системе газ – окатыш – свод печи – свободная поверхность угольной подушки. Теплообмен в угольной подушке и огнеупорной подине рассчитывается с учетом их теплопроводности, зависящей от температуры.

После расчета теплообмена в печи по зонам восстановления, плавления и охлаждения компьютерная программа выдает зональный тепловой баланс, удельный расход топлива на отопление печи и графический материал для конкретного варианта исходных данных.

Далее приведены для примера некоторые результаты моделирования процесса восстановления окатышей, содержащих 20 % угля, в печи диаметром 60 м (по оси пода) и с шириной пода 8 м, показавшие удовлетворительное соответствие результатов модельных расчетов имеющимся данным экспериментов на пилотных установках.

На рис. 1 показано изменение по длине печи температуры поверхности окатышей ($T_{\text{ок(н)}}$) и его центра ($T_{\text{ок(ц)}}$), средней степени восстановления железа (ϕ), степени «выгорания» (расходования) углерода (ψ) и степени разложения известняка (CaCO_3). Время пребывания окатышей в печи принято в этом расчете в соответствии с имеющимися в литературе данными. Как видно на этом рисунке, к расстоянию 110 м все физико-химические процессы в окатышах завершаются (общая длина подины составляет 188 м). Далее осуществляются процессы плавления окатышей и их охлаждение.

На рис. 2 представлено распределение ϕ , ψ и температуры по радиусу окатыша на длине 35 м от загрузки окатышей. Эти данные показывают, что перепад температуры по радиусу окатыша составляет порядка 200 °С, а ϕ и ψ в поверхностном слое окатыша больше примерно на 10 %, чем в его центре.

На рис. 3 приведены данные о составе газа в порах окатыша по его радиусу. Из графика следует, что в глубине окатыша соотношение $\text{CO}/\text{CO}_2 \approx 27/72 = 0,38$, а в наружных слоях $\text{CO}/\text{CO}_2 \approx 74/25 = 3,0$, что близко к равновесию соответственно для реакций восстановления Fe_3O_4 и FeO . Сопоставив эти данные с рис. 2 видим, что в середине радиуса окатыша $\phi \approx 30$ %, т.е. действительно происходит переход от восстановления Fe_3O_4 к восстановлению FeO до металлического железа. Близость состава газа в порах к равновесию реакций восстановления свидетельствует о том, что лимитирующей является реакция газификации углерода. На этом же графике видно, что за счет диффузии в порах азот проникает в глубь окатыша примерно на 1,5 мм в период интенсивного восстановления железа (см. рис. 1). Распределение давления газа по радиусу окатыша в этот же период представлено на рис. 4, где видно, что в центре окатыша давление газа достигает величины более 2 кПа.

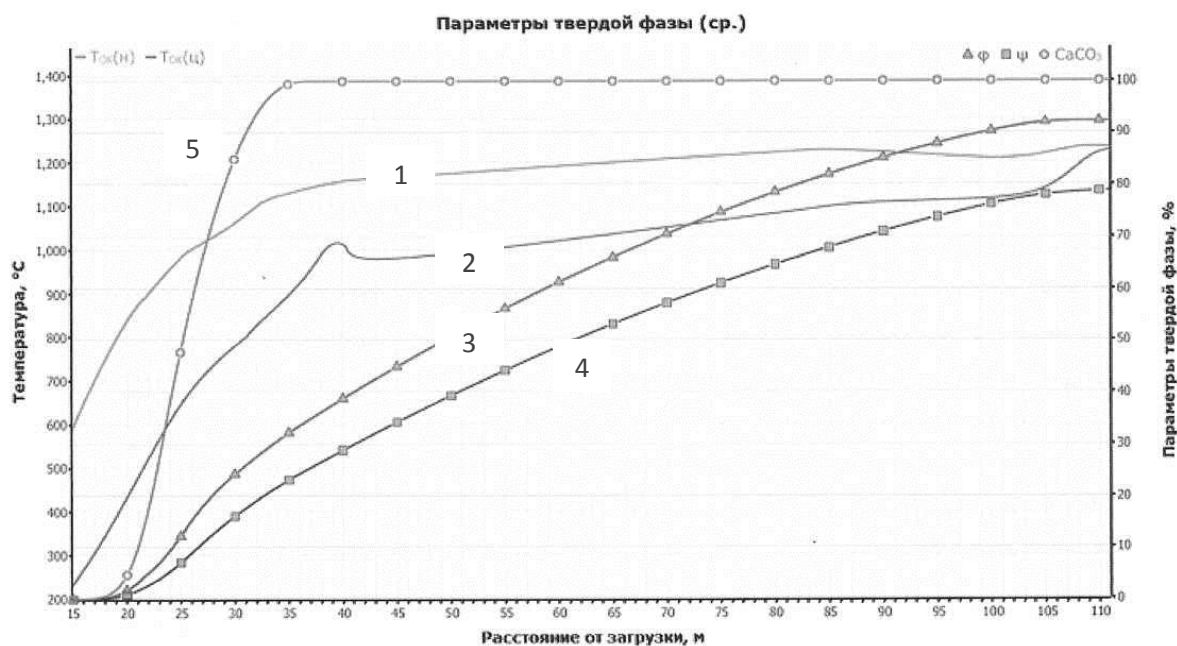


Рис. 1. Изменение температуры поверхности (1) и центра (2) окатыша, степени восстановления железа (3), степени «выгорания» углерода из угля (4) и степени разложения известняка (5) по длине печи

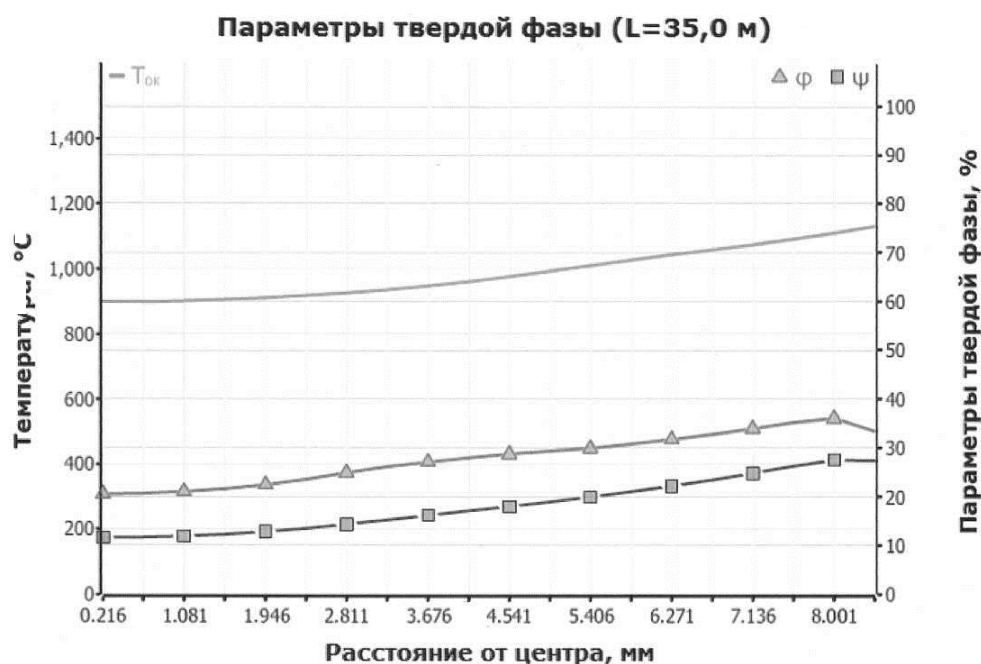


Рис. 2. Распределение степени восстановления железа (1), степени «выгорания» углерода (2) и температуры (3) по радиусу окатыша

На рис. 5 и 6 показано влияние некоторых технологических параметров на производительность печи при постоянной заданной конечной степени восстановления железа (95 %). Как следует из результатов моделирования, производительность печи практически обратно пропорциональна величине порозности окатышей, лежащих на подине (рис. 5).



Рис. 3. Распределение концентраций компонентов газа по радиусу окатыша

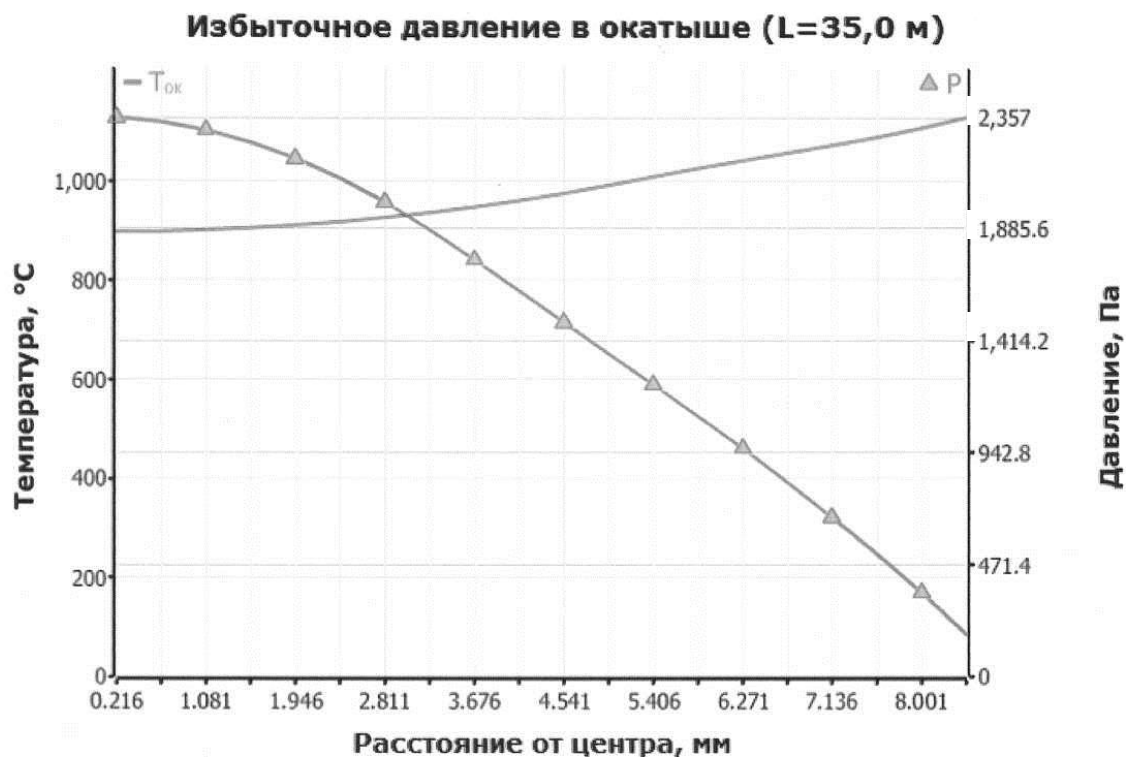


Рис. 4. Расчетное распределение давления газа в порах по радиусу окатыша

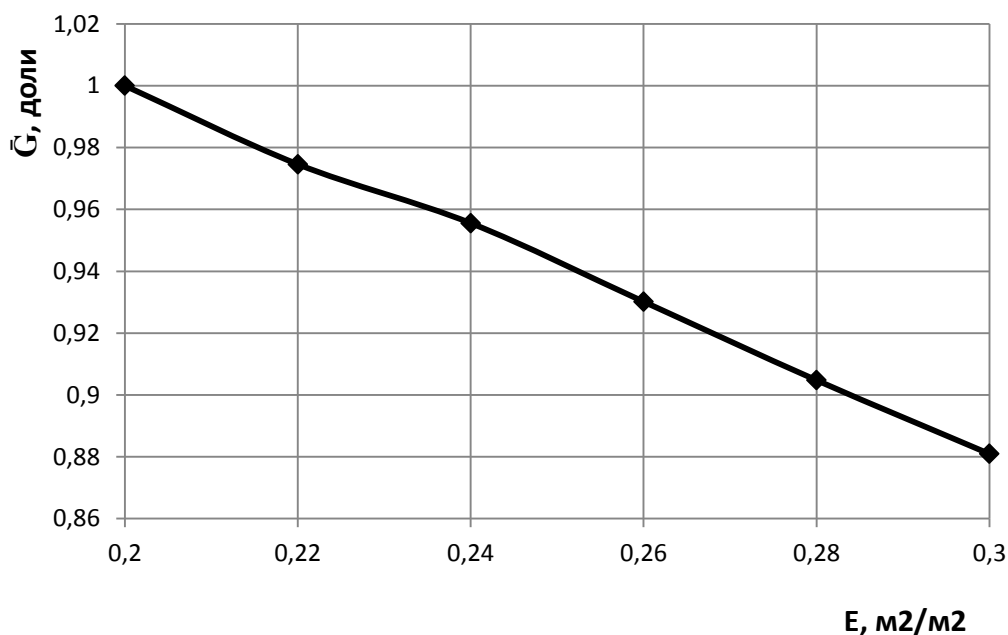


Рис. 5. Зависимость относительной производительности печи (\bar{G}) с заданной длиной зоны нагрева и восстановления от порозности слоя окатышей (E) на угольной подушке

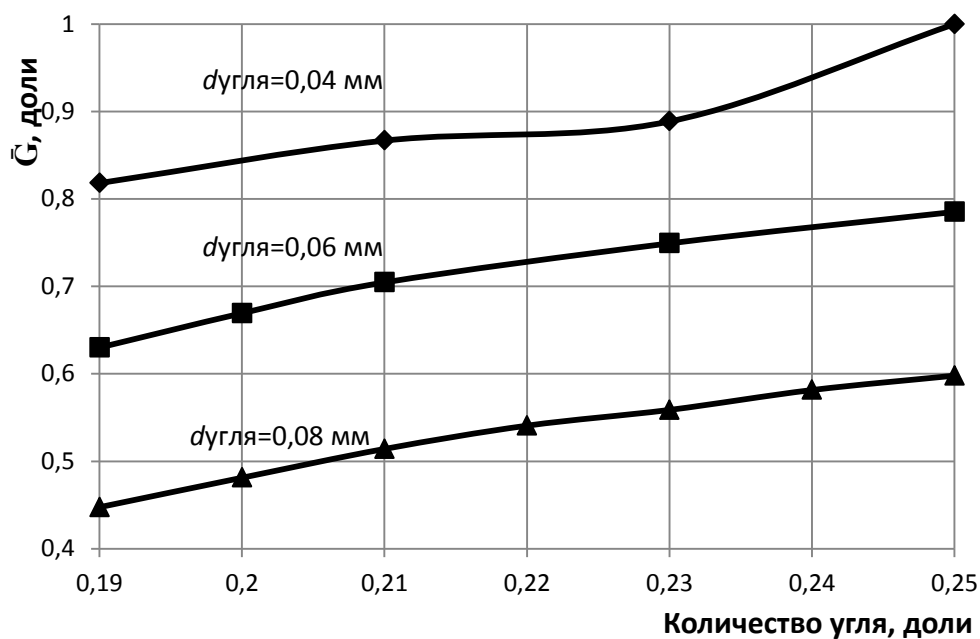


Рис. 6. Зависимость относительной производительности печи от доли угля в шихте окатышей и от среднего размера частиц угля

На рис. 6 представлены результаты расчетов производительности печи при различной крупности частиц угля и с различным содержанием угля в окатышах. Из этих данных следует, что влияние крупности частиц угля (тонины помола) значительно сильнее, чем содержания угля в окатышах. Это подтверждает ранее сделанный вывод о лимитирующем характере реакции газификации угля в процессе восстановления железа в рудоугольных окатышах.

Таким образом, результаты проведенных предварительных расчетов с помощью разработанной математической модели технологического процесса ITmk-3 не противоречат основным физико-химическим и термодинамическим закономерностям процесса восстано-

ния рудодоугольных окатышей и соответствуют данным, имеющимся в литературе. Разработанная модель может быть использована для оптимизации технологических параметров процесса и свойств шихтовых материалов.

Список использованных источников

1. I. Kobayachi, Y. Tanigaki, A. Uragami. Engineering Company, Kobe Steel, Ltd, Osaka, Japan // Iron and Steelmaker. 2001. Vol.28, №9. Pp. 19–22.
2. Shoichi Kikuchi, Shuzo Ito, Dr. Isao Kobayashi, Osamu Tsuge, Koji Tocuda. «ITmk3 Process», Kobelco technology review. 2010. №29 Dec. P. 77.
3. Дубровский Б. А., Шиляев П. В., Редин Е. В. и др. Металлизация шпатовых железняков Бакальского месторождения с получением гранулированного чугуна // Сборник трудов VI международной конференции «Энергосберегающие технологии в промышленности, печные агрегаты, экология». М.: МИСиС, 2012. С. 178–182.

УДК 669.013

Б. А. Боковиков, А. А. Солодухин

ООО «Научно–производственное внедренческое предприятие ТОРЭКС»,
г. Екатеринбург, Россия

К ВЫБОРУ СПОСОБА УМЕНЬШЕНИЯ ПЕРЕУВЛАЖНЕНИЯ ОКАТЫШЕЙ В ЗОНЕ СУШКИ ОБЖИГОВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ МАШИНЫ

Аннотация

Рассмотрен способ уменьшения переувлажнения слоя сырых окатышей на обжиговой машине с помощью камеры предварительного подогрева (КПП). На основании результатов расчетов на математической модели показана эффективность работы КПП при различных условиях и определены оптимальные параметры ее работы.

Ключевые слова: переувлажнение, сушка, камера предварительного подогрева.

Abstract

The method of overwatering reduction for green pellets bed have been considered on the IM by means of preheating chamber. An efficiency of preheating chamber operation is ensured on the basis of estimation results using the math model. And as a result, preheating chamber was tested in various conditions with determination of its optimal operation parameters.

Keywords: overwatering, drying, preheating chamber.

Сушка окатышей занимает до 30 % площади обжиговых конвейерных машин, что является основным сдерживающим фактором повышения их производительности. В связи с этим естественно стремление интенсифицировать процесс сушки за счет повышения температуры